

УДК 669.1:539.382.2:539.374

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА МАКРОЛОКАЛИЗАЦИЮ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ*

Баранникова С.А.^{1,2}, д.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник (bsa@ispms.tsc.ru)

Косинов Д.А.³, инженер кафедры физики им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

Зуев Л.Б.^{1,2}, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией физики прочности, профессор кафедры «Теория прочности и проектирование» (lbz@ispms.tsc.ru)

Громов В.Е.³, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

Коновалов С.В.³, д.т.н., профессор кафедры физики им. В.М. Финкеля (konovalov@physics.sibsiu.ru)

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
(634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4)

² Национальный исследовательский Томский государственный университет
(634034, Россия, Томск, пр. Ленина, 36)

³ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. В работе исследованы особенности локализации пластической деформации при растяжении низкоуглеродистой стали 08пс после горячей прокатки и после процесса электролитического насыщения водородом с использованием трехэлектродной электрохимической ячейки. Установлено усиление локализации пластической деформации после легирования водородом. Анализ стадийности деформационных кривых показал наличие площадки текучести, стадии линейного деформационного упрочнения и стадии параболического деформационного (Тейлоровского) упрочнения. Для выявления и визуализации зон локализованной деформации был использован метод двухэкспозиционной спекл-фотографии, позволяющий получить количественные характеристики деформации, т.е. определить поле векторов смещения в плоском образце при растяжении и далее рассчитать компоненты тензора пластической дисторсии (локальные удлинения ϵ_{xx} , сдвиг ϵ_{xy} и поворот ω_z). Определены основные типы и параметры локализации пластического течения на разных стадиях деформационного упрочнения.

Ключевые слова: сталь, пластичность, спекл-фотография, локализация деформации, водородное охрупчивание, стадийность, тензор дисторсии, прокатка.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-891-895

В настоящее время в результате накопленных экспериментальных и теоретических исследований [1 – 4] становится все более очевидным, что при прогнозировании долговечности конструкций, изготовленных практически из любого металла и сплава, нужно учитывать степень вредного влияния, которое оказывает водород на свойства металлов и сплавов при их выдержке в любой водородсодержащей среде на стадиях изготовления, обработки и в процессе эксплуатации.

Процесс водородного охрупчивания является следствием действия многих факторов. Определяющую роль при этом играют фазовый состав, структура, размеры, морфология вторых фаз, дефектная субструктура и сос-

тояние твердого раствора материала [5 – 9]. Большинство из этих факторов взаимосвязаны, что затрудняет понимание и прогнозирование процесса в целом.

При травлении горячекатаных катанки и полос кислорода, кроме реакции с окислами, воздействует и на сталь с выделением атомарного водорода, который, с одной стороны, способствует механическому отрыву нерастворенной окислы от поверхности, а с другой, диффундируя в металл, вызывает явление охрупчивания. Растворенный водород приводит к существенному изменению механических и физико-химических свойств материала из-за образования дефектной структуры [10].

Экспериментальные данные о природе пластической деформации показывают, что присущая ей с самого начала деформирования неоднородность может приводить к раннему формированию одного или нескольких устойчивых очагов локализации пластического течения. Исследования макролокализации деформации позволили установить однозначное соответствие меж-

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Государственной академии наук в 2015 – 2020 гг. и Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2016 г. и гранта РФФИ № 16-08-00385-а.

Считаем своим приятным долгом выразить благодарность М.В. Надежину, А.Г. Луеву и В.В. Горбатенко за помощь в проведении экспериментов и обсуждении результатов работы.

ду законом пластического течения на данном участке деформационной кривой и типом пространственно-временного распределения компонент тензора пластической дисторсии [11].

Знание закономерностей и природы локального течения материалов может существенно облегчить процесс их пластического формоизменения, что особенно важно при горячей и холодной прокатке полос, для которых локализация деформации может приводить к появлению дефектов и разрушению [12].

Целью настоящей работы является сравнительный анализ влияния водорода на картины локализации деформации на разных стадиях нагружения растяжением низкоуглеродистой стали.

В качестве материала исследования использовали конструкционную сталь 08пс. Испытания на растяжение были выполнены на плоских образцах в форме двойной лопатки с размерами рабочей части $50 \times 10 \times 2$ мм. Как и в работе [13] образцы растягивали на универсальной испытательной машине «Instron-1185» при комнатной температуре с постоянной скоростью перемещения подвижного захвата $V_m = 0,2$ мм/мин. Для исследований макроскопической локализации пластического течения использовали технику двухэкспозиционной спекл-фотографии [11], сочетающей в себе возможности наблюдения всего деформируемого образца в целом (характерный размер поля зрения примерно 100×100 мм) с разрешающей способностью на уровне оптического микроскопа (приблизительно 1 мкм). Образцы вырезали из полос после горячей прокатки (исходное состояние 1) и подвергали насыщению водородом (состояние 2).

Наводороживание образцов осуществляли в трехэлектродной электрохимической ячейке при постоянном контролируемом катодном потенциале $U = -600$ мВ, задаваемом относительно хлор-серебряного электрода сравнения, в 1N растворе серной кислоты с добавлением 20 мг/л тиомочевины при температуре 323 К в течение 24 ч. Вольтамперные кривые фиксировали с помощью потенциостата ИРС-Сомраст. До испытаний наводороженные образцы хранили в жидком азоте.

Для исследования кинетики развития неоднородной пластической деформации использовали измерительные комплексы ALMEC с фотографической и ALMEC-tv цифровой регистрацией изображения [14, 15], позволяющие восстанавливать поле векторов смещения и вычислять компоненты тензора пластической дисторсии $\epsilon_{xx}, \epsilon_{xy}$ (локальные удлинение и сужение).

Из зависимостей координат очагов локализации X от времени t , наложенных на диаграмму пластической деформации, получены количественные данные о кинетике локализации пластического течения вдоль всей кривой $\sigma(\epsilon)$. Из зависимостей $X(t)$ определяются пространственный λ и временной T периоды соответствующих процессов, а затем вычисляется скорость движения очагов локализованной пластичности $V_{av} = \lambda/T$ [11].

Структура стали в исходном состоянии представляет собой α -железо (феррит) со следами перлита. Средний размер зерна $14,3 \pm 6,4$ мкм.

Деформационные кривые образцов имели площадку текучести, стадии линейного и параболического деформационного упрочнения. В исходном состоянии (1) площадка текучести (при нулевом коэффициенте деформационного упрочнения $\theta_l = 0$) вместе с зубом текучести имела протяженность 2,5 % и была обусловлена зарождением и распространением по образцу полос Людерса. Анализ распределений локальных деформаций показал, что пластическая деформация с самого начала нагружения распределена по образцу неоднородно, то есть локализована в зонах макроскопического масштаба, в то время как другие объемы при этом же приросте деформации практически не деформируются. Распределения локальных удлинений на площадке текучести (рис. 1, вставка, кривая 1) представляли собой зону локализованной деформации 1 (полосу Людерса), зародившуюся вблизи неподвижного захвата испытательной машины (рис. 2, а). Фронт пластической деформации 1 перемещался от неподвижного захвата с постоянной скоростью $V_I \sim 8,5 \cdot 10^{-5}$ м/с (рис. 3, а). Далее на площадке текучести в средней части образца зарождалась зона локализованной деформации 2 (рис. 2, б), которая на протяжении площадки текучести двигалась с постоянной скоростью $V_{II} \sim 3,8 \cdot 10^{-5}$ м/с по направлению к подвижному захвату (рис. 3, а). Затем фронт пластической деформации 1 начинает двигаться с меньшей скоростью $V_{I'} \sim 3,5 \cdot 10^{-5}$ м/с (рис. 3, а). В этот момент времени вблизи зоны локализованной деформации 2 зарождается новая зона локализованной деформации 3 (рис. 2, в), которая начинает двигаться с постоянной скоростью $V_{III} \sim 6,8 \cdot 10^{-5}$ м/с в противоположном направлении к зоне локализованной деформации 2.

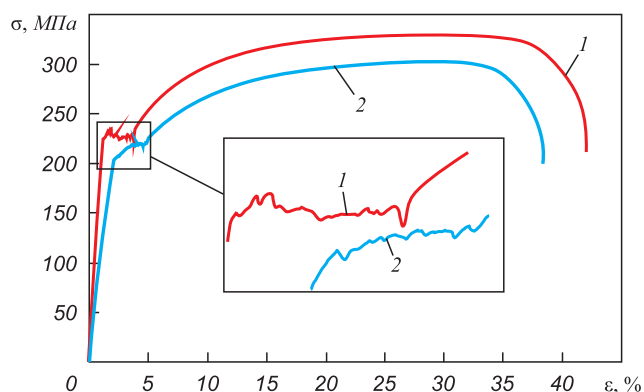


Рис. 1. Кривые нагружения стали 08пс при комнатной температуре: 1 – образцы в состоянии после горячей прокатки; 2 – образцы в состоянии после электролитического насыщения в трехэлектродной ячейке в течение 24 ч (на вставке выделена площадка текучести)

Fig. 1. Load curves of low-carbon 08ps steel at room temperature: 1 – samples after hot rolling; 2 – samples after hydrogen charging for 24 hours in a thermostatic three-electrode cell (framing shows yield plateau)

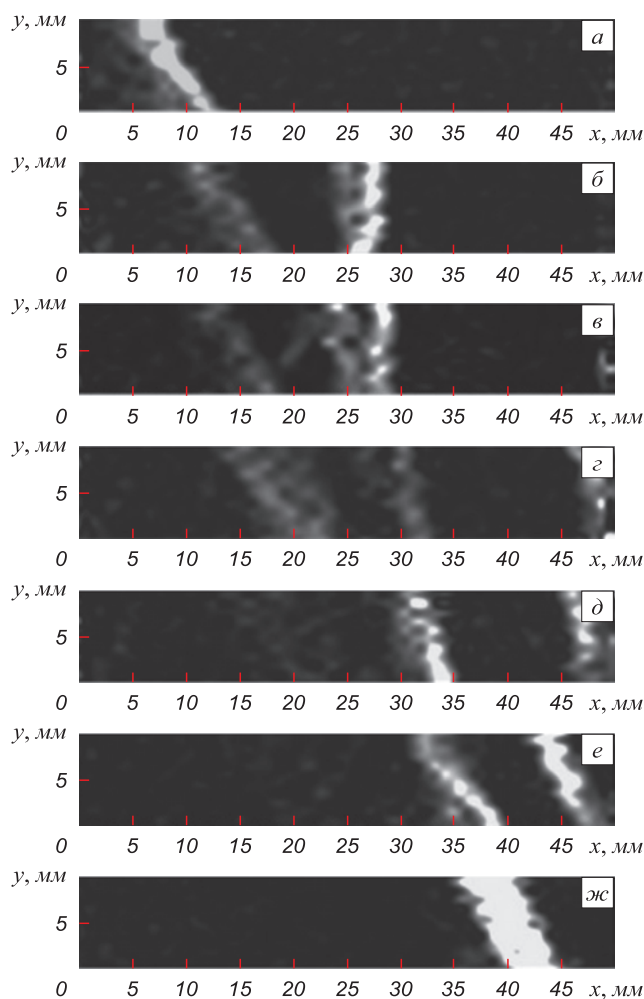


Рис. 2. Картины локализации пластической деформации стали 08пс в состоянии 1 в виде полутоновых картин на площадке текучести (зарождение (а) и распространение (б – ж) полос Чернова-Людерса по длине образца)

Fig. 2. Patterns of the localization of plastic deformation of 08ps steel for state 1, as halftone image, on yield plateau: (a) nucleation and (б – ж) propagation of the Lüders band through the sample

ции 1 (рис. 3, а). Зоны локализованной деформации 1 и 3 движутся навстречу друг другу, и после «встречи» происходит их взаимное «гашение» (рис. 2, г). Далее на площадке текучести по направлению к подвижному захвату продолжает двигаться зона локализованной деформации 2 (рис. 3, а). Затем вблизи подвижного захвата зарождается новая зона локализованной деформации 4 (рис. 2, д), которая начинает двигаться с постоянной скоростью $V_{IV} \sim 8,5 \cdot 10^{-5}$ м/с по направлению к неподвижному захвату (рис. 3, а). Зоны локализованной деформации 2 и 4 движутся навстречу друг другу (рис. 2, е) и после их «встречи» (рис. 2, ж) площадка текучести заканчивается. На стадии линейного деформационного упрочнения протяженностью 2,5 % с постоянным коэффициентом деформационного упрочнения ($\theta = 700$ МПа) пространственный период волн локализации деформации составляет $8,0 \pm 1,0$ мм, а скорость их распространения $V_{II} \sim 5,3 \cdot 10^{-5}$ м/с (рис. 3, б).

Результаты механических испытаний образцов в состоянии 2 показали, что в исходном состоянии без водорода и после электролитического насыщения водородом в течение 24 ч наблюдается снижение характеристик прочности и пластичности на 10 % (рис. 1, кривая 2).

Влияние водорода на деформационное поведение становится заметным в начальный момент пластической деформации. В состоянии 2 вместо горизонтальной площадки текучести наблюдается «пилообразный» участок деформационной кривой с постоянным коэффициентом деформационного упрочнения ($\theta = 450$ МПа) протяженностью до 4,8 % (рис. 1, вставка, кривая 2). На этой стадии распределений локальных деформаций представляли собой две зоны локализованной деформации (полосы Людерса) (рис. 4), которые перемещались навстречу друг другу со скоростями $1,4 \cdot 10^{-4}$ и $5,5 \cdot 10^{-5}$ м/с (рис. 5, а). «Встреча» описываемых очагов деформации соответствовала окончанию стадии площадки текучести. На стадии линейного деформационного упрочнения протяженностью 2,5 % с постоянным коэффициентом деформационного упрочнения ($\theta = 730$ МПа) распределения локальных деформаций представляют собой расположенные на

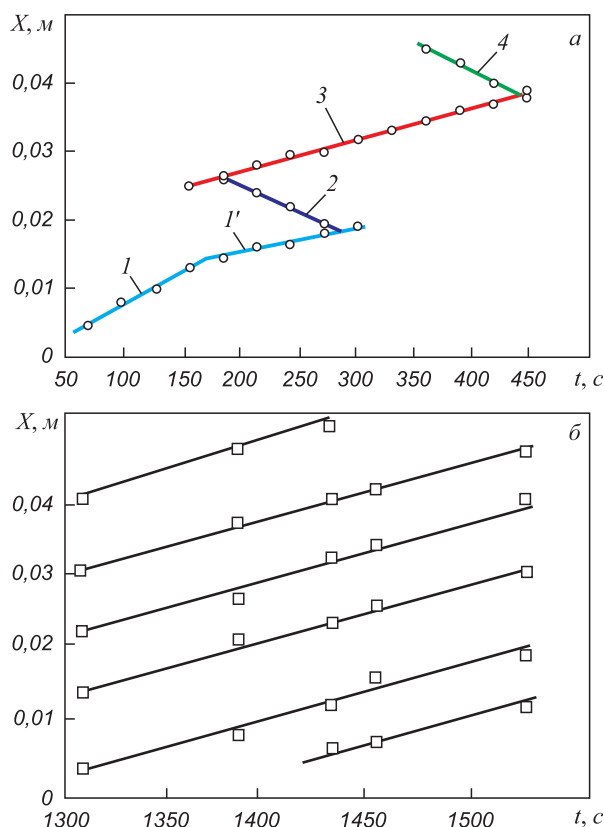


Рис. 3. Диаграмма пространственно-временной эволюции очагов локализованной деформации ϵ_{xx} стали 08пс в состоянии 1: а – на площадке текучести; б – на стадии линейного деформационного упрочнения

Fig. 3. Diagram of spatio-temporal evolution of localized deformation sites ϵ_{xx} of 08ps steel for state 1: а – on yield plateau; б – on linear work-hardening stage

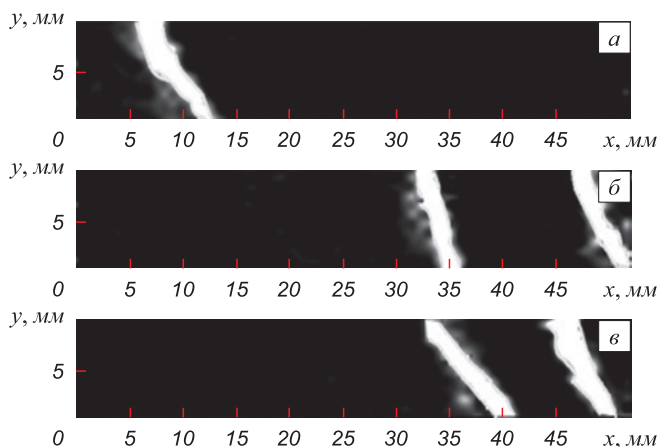


Рис. 4. Картины локализации пластической деформации стали 08пс в состоянии 2 в виде полутоновых картин на площадке текучести (распространение (а – в) полос Чернова-Людерса по длине образца)

Fig. 4. Patterns of the localization of plastic deformation of 08ps steel for state 2, as half-tone image, on yield plateau: (а – в) propagation of the Chernov-Lüders band through the sample

одинаковых расстояниях $6,0 \pm 1,0$ мм зоны локализации деформации. На протяжении стадии линейного деформационного упрочнения эти зоны локализации перемещались с постоянной скоростью $V_{II} = 8,3 \cdot 10^{-5}$ м/с (рис. 5, б).

Выводы. Выявлена роль водорода в локализации пластической деформации на площадке текучести (при нулевом или малом уровне коэффициента деформационного упрочнения) и на стадии линейного деформационного упрочнения с постоянным коэффициентом деформационного упрочнения в стали 08пс. Показано, что площадка текучести обусловлена зарождением и распространением по образцу полос Людерса. В состоянии после горячей прокатки, на площадке текучести отмечено движение четырех зон локализованной деформации, а в состоянии после электролитического насыщения водородом зафиксировано движение двух зон локализованной деформации навстречу друг другу. В наводороженных образцах установлен эффект усиления локализации пластической деформации по сравнению с исходным состоянием. Это проявилось в изменении структуры очага локализации деформации и изменении пространственного периода распределений локальных деформаций на стадии линейного деформационного упрочнения и связано с влиянием водорода на параметры макроскопической локализации пластической деформации. Полученные результаты могут быть использованы при разработке критериев оценки технологической пластичности при горячей и холодной прокатке сталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полторацкий Л.М., Громов В.Е., Чинокалов В.Я. Водород в сталях и сплавах. (Современное состояние вопроса). – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2008. – 162 с.

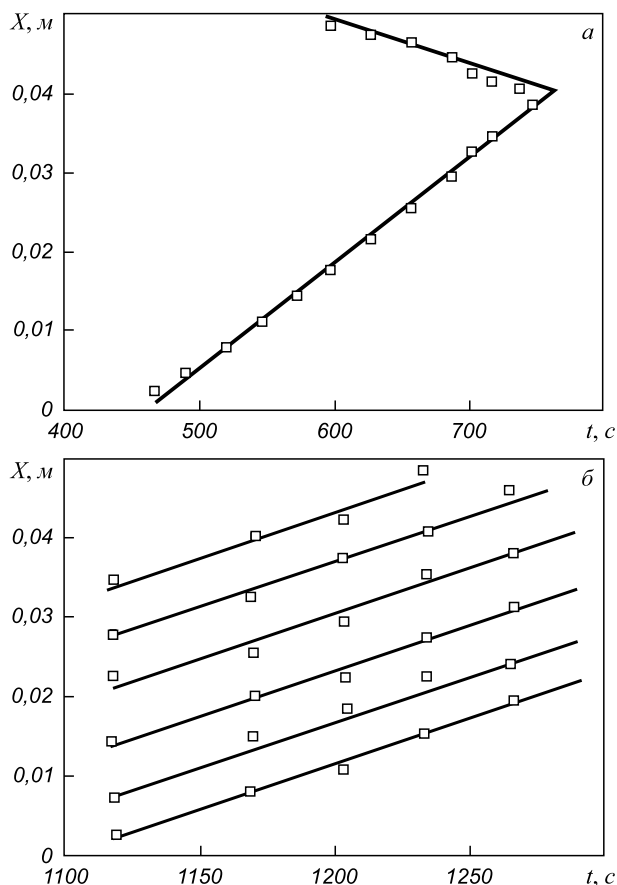


Рис. 5. Диаграмма пространственно-временной эволюции очагов локализованной деформации ϵ_{xx} стали 08пс в состоянии 2: а – на площадке текучести; б – на стадии линейного деформационного упрочнения

Fig. 5. Diagram of spatio-temporal evolution of localized deformation sites ϵ_{xx} of 08ps steel for state 2: а – on yield plateau; б – on linear work-hardening stage

2. Hillier E.M.K., Robinson M.J. Hydrogen embrittlement of high strength steel electroplated with zinc-cobalt alloys // Corros. Sci. 2004. Vol.46. P. 715 – 727.

3. Askari A., Das S. Practical numerical analysis of a crack near a weld subjected to primary loading and hydrogen embrittlement // J. Mater. Process. Tech. 2006. Vol. 173. P. 1 – 13.

4. Panagopoulos C.N., El-Amoush A.S., Georgarakis K.G. The effect of hydrogen charging on the mechanical behaviour of a-brass // J. Alloys. Compd. 2005. Vol. 392. P. 159 – 164.

5. Sofronis P., Liang Y., Aravas N. Hydrogen induced shear localization of plastic flow in metals and alloys // Eur. J. Mech. A: Solids. 2001. Vol. 20. P. 857 – 872.

6. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Metallurgiya, 1985. – 216 с.

7. Ramunni V.P., De Paiva Coelho T., de Miranda P.E.V. Interaction of hydrogen with the microstructure of low-carbon steel // Mater. Sci. Eng. 2006. Vol. A 435-436. P. 504 – 514.

8. Hardie D., Xu J., Charles E.A., Wei Y. Hydrogen embrittlement of stainless steel overlay materials for hydrogenators // Corros. Sci. 2004. Vol. 46. P. 3089 – 3100.

9. Yagodnisky Y., Saukkonen T., Kilpeläinen S., Tuomisto F., Hänninen H. Effect of hydrogen on plastic strain localization in single crystals of austenitic stainless steel // Scripta Mater. 2010. Vol. 62. P. 155 – 158.

10. Алефельд Г., Фелькль И. Водород в металлах. Т. 1. Основные свойства. – М.: Мир, 1981. – 476 с.; Т. 2. Прикладные аспекты. – М.: Мир, 1981. – 430 с.

11. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. – Новосибирск: Наука, 2008. – 327 с.
12. Производство листового проката в валках переменного сечения / О.Е. Браунштейн, В.И. Базайкин, В.Е. Громов, В.В. Дорофеев. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2008. – 116 с.
13. Шляхова Г.В., Баранникова С.А., Зуев Л.Б., Косинов Д.А. Локализация пластической деформации в монокристаллах легированного γ -железа при электролитическом насыщении водородом // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 8. С. 37 – 42.
14. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. – М.: Мир, 1986. – 327 с.
15. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V. Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses // Measur. Sci. Technol. 2010. Vol. 21. No. 5. P. 054014 – 054019.

Поступила 7 ноября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 12, PP. 891–895.

HYDROGEN EFFECT ON MACROLOCALIZATION OF PLASTIC DEFORMATION OF LOW CARBON STEEL

S.A. Barannikova^{1,2}, D.A. Kosinov³, L.B. Zuev^{1,2}, V.E. Gromov³, S.V. Konovalov³

¹Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

³Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The paper presents the localization of the plastic deformation features. The studies were performed for the test samples of low-carbon 08ps steel sheet after hot rolling as a result of electrolytic saturation by hydrogen in a thermostatic three-electrode cell at constant potential. Enhancement of the localization of plastic deformation was established. Analysis of the stages of the stress-strain curves revealed the yield line, linear work-hardening stage and (Taylor) parabolic work-hardening stage. Using the speckle-photography technique, the patterns of plastic deformation localization were exposed with subsequent determination of the displacement vector field in the flat sample and calculation of the components of the tensor plastic distortion (local elongation ϵ_{xx} , ϵ_{yy} shift and rotation ω_z). The main type and parameters of the localization of plastic flow for distinct work-hardening stages were determined.

Keywords: steel, plasticity, speckle-photography, deformation localization, hydrogen embrittlement, staging, distortion tensor, rolling.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-891-895

REFERENCES

1. Poltoratskii L.M., Gromov V.E., Chinokalov V.Ya. *Vodorod v stalyakh i splavakh (Sovremennoe sostoyanie voprosa)* [Hydrogen in steels and alloys. (Modern state of the question)]. Novokuznetsk: SibGIU, 2008, 162 p. (In Russ.).
2. Hillier E.M.K., Robinson M.J. Hydrogen embrittlement of high strength steel electroplated with zinc-cobalt alloys. *Corros. Sci.* 2004, vol. 46, pp. 715–727.
3. Askari A., Das S. Practical numerical analysis of a crack near a weld subjected to primary loading and hydrogen embrittlement. *J. Mater. Process. Tech.* 2006, vol. 173, pp. 1–13.
4. Panagopoulos C.N., El-Amoush A.S., Georgarakis K.G. The effect of hydrogen charging on the mechanical behaviour of α -brass. *J. Alloys. Compd.* 2005, vol. 392, pp. 159–164.
5. Sofronis P., Liang Y., Aravas N. Hydrogen induced shear localization of plastic flow in metals and alloys. *Eur. J. Mech. A: Solids.* 2001, vol. 20, pp. 857–872.
6. Kolachev B.A. *Vodorodnaya khрупkost' metallov* [Hydrogen fragility of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 216 p. (In Russ.).
7. Ramunni V.P., De Paiva Coelho T., de Miranda P.E.V. Interaction of hydrogen with the microstructure of low-carbon steel. *Mater. Sci. Eng.* 2006, vol. A 435-436, pp. 504–514.
8. Hardie D., Xu J., Charles E.A., Wei Y. Hydrogen embrittlement of stainless steel overlay materials for hydrogenators. *Corros. Sci.* 2004, vol. 46, pp. 3089–3100.

9. Yagodzinskyy Y., Saukkonen T., Kilpeläinen S., Tuomisto F., Hänninen H. Effect of hydrogen on plastic strain localization in single crystals of austenitic stainless steel. *Scripta Mater.* 2010, vol. 62, pp. 155–158.
10. Georg Alefeld, Johann Völkl. *Hydrogen in Metals*. Vol. 1. *Basic Properties*. Vol. 2. *Application-Oriented Properties*. Springer-Verlag, 1978. (Russ.ed.: Alefeld G., Völkl J. *Vodorod v metallakh*. T. 1. *Osnovnye svoystva*. T. 2. *Prikladnye aspekty*. Moscow: Mir, 1981.).
11. Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A. *Fizika makrolokalisatsii plasticheskogo techeniya* [Physics of plastic flow macrolocalization]. Novosibirsk: Nauka, 2008, 327 p. (In Russ.).
12. Braunshtein O.E., Bazaikin V.I., Gromov V.E., Dorofeev V.V. *Proizvodstvo listovogo prokata v valkakh peremennogo secheniya* [Production of sheet metal in rolled sheets in rollers of variable cross-sections]. Novokuznetsk: SibGIU, 2008, 116 p. (In Russ.).
13. Shlyakhova G.V., Barannikova S.A., Zuev L.B., Kosinov D.A. Plastic strain localization in alloyed γ -Fe single crystals electrolytically saturated with hydrogen. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 8, pp. 37–42. (In Russ.).
14. Jones Robert, Catherine Wykes. *Holographic and Speckle Interferometry*. Cambridge University Press, 1983. (Russ.ed.: Jones R., Wykes C. *Golograficheskaya i spekl-interferometriya*. Moscow: Mir, 1986, 327 p.).
15. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V. Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses. *Measur. Sci. Technol.* 2010, vol. 21, no. 5, pp. 054014–054019.

Acknowledgements. The work was supported by the Program of Fundamental Research of the State Academy of Sciences in 2015 – 2020 yrs., the Tomsk State University Academic D.I. Mendeleev Fund Program in 2016 and the Russian Foundation for Basic Research (project no. 16-08-00385-a).

The authors express gratitude to M.V. Nadeschkin, A.G. Lunev and V.V. Gorbatenko for help with the experiments and discussion of the results.

Information about the authors:

S.A. Barannikova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Professor, Leading Researcher (bsa@ispms.tsc.ru)

D.A. Kosinov, Engineer of the Chair of Physics named after V.M. Finkel (gromov@physics.sibsiu.ru)

L.B. Zuev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Physics of Strength and Plasticity, Professor of the Chair “Theory of Strength and Designing” (lbz@ispms.tsc.ru)

V.E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Physics named after V.M. Finkel (gromov@physics.sibsiu.ru)

S.V. Konovalov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Physics named after V.M. Finkel (konovalov@physics.sibsiu.ru)

Received November 7, 2016